

# Micro-LED 디스플레이 구동 기술

박찬진, 강경수, 박지환, 이수연  
(서울대학교 전기·정보공학부)

## 1. 서론

현재 디스플레이 시장은 유기발광다이오드(OLED)를 기반으로 하는 대형, 중소형 제품이 주를 이루고 있다. 그러나 디스플레이의 목적 및 형태가 차량의 head-up display (HUD) 부터 public information display (PID), AR/VR 기기까지 다양해지면서 각 목적에 알맞은 디스플레이를 만들기 위한 연구가 계속되고 있다. 그중 Micro-LED 디스플레이는 다양한 면적 및 형태 구현이 가능하고, 기존 OLED 디스플레이 못지않은 뛰어난 화질을 가진다는

점에서 많은 관심을 받고 있다. OLED와 같이 self-emissive 방식을 사용하는 Micro-LED는 OLED 대비 빠른 반응 속도와 높은 에너지 효율을 가진다. 뿐만 아니라 100  $\mu\text{m}$  이하의 크기로 제작되기 때문에 OLED 대비 작은 pixel pitch 구현이 가능하여 초고 해상도 구현이 가능하며, modular type display에 적용을 하는 경우에도 모듈 사이의 경계가 거의 보이지 않는다. 특히 무기물을 기반으로 하기 때문에 기존의 OLED에서 나타났던 burn-in 현상이 나타나지 않는다는 점에서 OLED를 대신할 수 있는 차세대 디스플레이 소자로 자리매김하고있다 (그림 1). 이에 따라

	OLED	Micro-LED
Contrast Ratio	10 <sup>6</sup> : 1	10 <sup>8</sup> : 1
Central wavelength shift regarding viewing angle	Severe	Unchanged(unnoticeable)
Response time	$\mu\text{s}$	ns
Efficiency	Medium	High
Pixel Pitch	Larger	Smaller
Life time	Short	50,000 h ~
Structure		

그림 1. OLED와 micro-LED 디스플레이 비교

기존의 OLED와는 다른 광학 특성을 가지는 Micro-LED의 구동방식에 대한 연구가 늘어나고 있다. 본 고에서는 Micro-LED 디스플레이 능동 구동 기술에 대해 기술하고자 한다. 먼저 Micro-LED의 광학 특성을 보상할 수 있는 구동 방식을 소개하고, 해당 구동 방식에서 나타날 수 있는 문제점들과, 그 문제점들을 해결하기 위한 방안들을 소개하고자 한다.

## 2. Micro-LED 특성과 PWM 구동

일정한 시간 동안의 시각 정보를 평균하여 색 및 휘도를 인식하는 인간 시각 시스템의 특성<sup>[1]</sup>을 이용한 능동 구동 픽셀의 휘도 표현 방식에는 Pulse Amplitude Modulation (PAM) 방식과 Pulse-Width-Modulation (PWM) 방식, 두 가지가 있다. PAM 방식이란 LED의 발광 길이는 고정하고 발광 전류의 크기를 통해 패널의 휘도를 조절하는 방식을 말한다 (그림 2(a)). 이 경우 LED에 흐르는 전류의 크기가 커질수록 휘도가 증가하게 된다. PWM 방

식은 LED의 전류는 고정된 채 발광 길이의 변화를 통해 휘도를 조절하는 방식이다 (그림 2(b)). PWM 방식의 경우 LED의 발광 시간이 길어질수록 휘도가 증가한다. OLED를 이용한 기존의 능동 구동 (active matrix OLED, AMOLED) 화소 회로의 경우 주로 PAM 구동 방식을 사용하고 있다. 그러나 Micro-LED 화소 회로의 경우 OLED와 같은 PAM 구동 방식을 적용하기 힘든데, 이는 Micro-LED와 같은 무기물 LED의 특성 때문이다. 무기물 LED의 경우 소자의 크기가 작아질수록 전류 밀도에 의한 파장 변화 (wavelength shift)가 심해지는데,<sup>[2]</sup> 작은 크기를 장점으로 갖는 Micro-LED의 경우 그림 3과 같이 파장 변화가 더욱 심하게 나타난다. 이러한 전류에 따른 파장의 변화는 휘도에 따른 색좌표의 변화를 야기한다. 따라서 기존의 OLED 디스플레이와 같이 PAM 방식을 사용하는 경우에는 색차에 의한 얼룩 등으로 인해 디스플레이의 화질이 저하될 수 있다. 이때, 구동 전류가 일정한 PWM 방식을 사용하면 색 좌표 변화 없이 계조 조절이 가능하다.

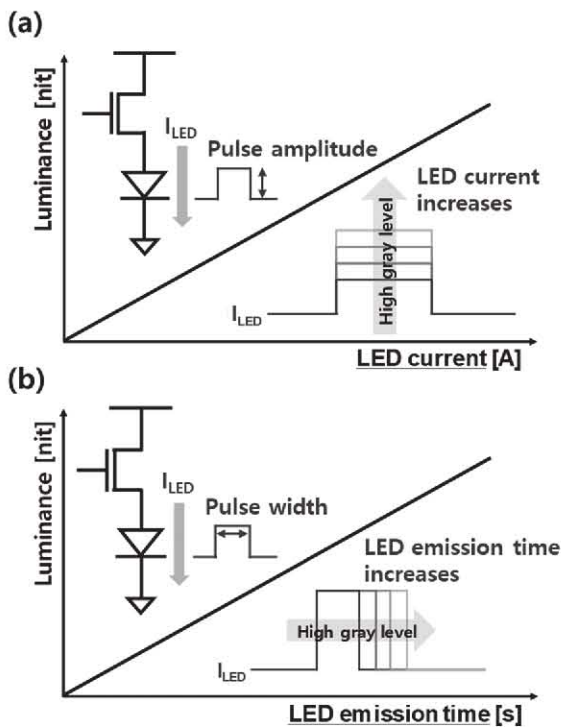


그림 2. (a) Pulse-Amplitude-Modulation 구동 방식과 (b) Pulse-Width-Modulation 구동방식

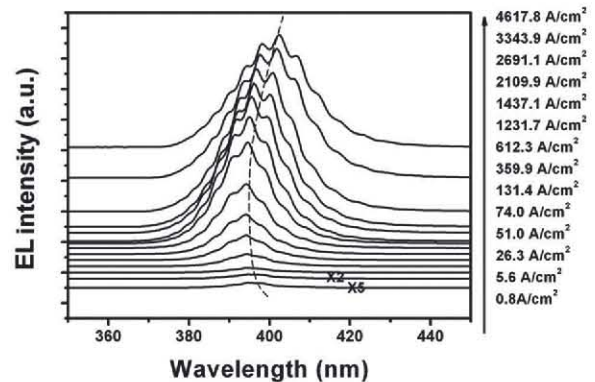


그림 3. Micro-LED의 전류 밀도에 따른 파장 변화<sup>[3]</sup>

PWM 구동 방식은 Micro-LED의 wavelength shift 방지 이외에도 소비전력 감소 측면에서 유리하다. 그림 4에서처럼, Micro-LED는 전류 밀도에 따라 파장뿐만 아니라 외부양자효율 (external quantum efficiency, EQE)이 변하며, 최대 EQE를 가지는 전류 구간이 존재한다. 이때 PWM 방식을 이용하면 일정한 구동 전류를 이용해 모든 계조 표현이 가능하므로, 모든 계조를 최대 외부양자 효율을

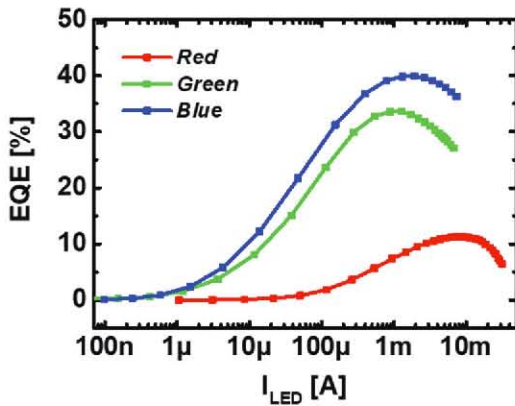


그림 4. Micro-LED의 전류 밀도에 따른 외부양자효율 변화

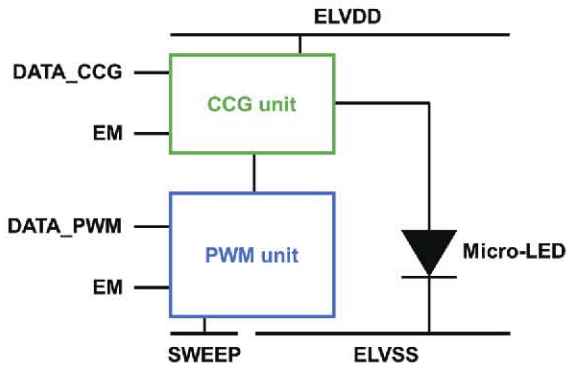


그림 5. PWM 구동 Micro-LED 회로회로 개념도

가지는 전류를 이용하여 구현할 수 있다. 결과적으로 PAM 방식 대비 디스플레이의 전력 효율이 증가한다.

PWM 구동 방식을 이용한 TFT 기반의 Micro-LED 회로회로는 그림 5에서와 같이 PWM unit과 constant current generation (CCG) unit으로 나누어진다. PWM unit은 인가된 발광 시간 조절을 위한 데이터 전압 (DATA\_PWM)에 따라 Micro-LED의 발광 시간을 조절하고, CCG unit은 emission 시간동안 Micro-LED에 일정한 전류가 흐를 수 있게 한다. Emission 구간동안 점진적으로 증가 또는 감소하는 SWEEP signal을 사용하여 인가된 PWM unit의 data 전압과의 비교를 통해 의해 PWM unit의 output 신호가 생성되고, 이 신호는 CCG unit에 전달되어 CCG unit의 turn on/off state가 결정된다. CCG unit의 driving TFT (DRT)가 켜져 있는 동안에만 Micro-LED가 발광하므로 DATA\_PWM 신호를 통해 발광 시간을 조절할 수 있다.

### 3. 동시발광과 순차발광

대부분의 전자기기와 마찬가지로 Micro-LED 디스플레이 기기에서도 소비전력을 줄이기 위한 방법이 강구되고 있다. 특히 앞에서 언급한 것처럼 최대 EQE를 가지는 전류 범위에서 구동을 할 뿐만 아니라, 순차발광 방식을 적용하는 경우 더욱 효율을 높일 수 있다. 그림 6은 동시 발광 방식과 순차 발광 방식을 나타내고 있다. 동시 발광 방식의 경우 디스플레이 패널의 전체 픽셀에 vertical 방향으로 데이터를 순차적으로 인가한 후 전체 픽셀이 동시에 발광하게 된다. 이 경우 모든 픽셀에 같은 타이밍의 scan signal이 입력되므로 필요한 emission driver 및 데이터를 인가하기 위한 scan driver circuit의 수가 감소할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 픽셀의 수가 증가할수록 한 프레임 내에서 세로 해상도\*1 Horizontal(1H) time 만큼 발광할 수 없다. 또한 전체 픽셀이 한번에 발광하기 때문에 순간 전력 소모가 크고, IR drop에 취약하다. 그에 반해 순차 발광 방식의 경우 디스플레이 패널의 horizontal line (H line)에 데이터가 순차적으로 인가된 후 emission도 순차적으로 일어나게 된다. 또한 한번에 켜져 있는 픽셀의 수가 동시 발광 방식에 비해 적으므로 IR drop이 작게 발행한다. 그러나 한 H line의 각 픽셀에 각각 다른 타이밍의 Scan signal이 인가되어야 하므로 동시발광 방식에 비해 driver

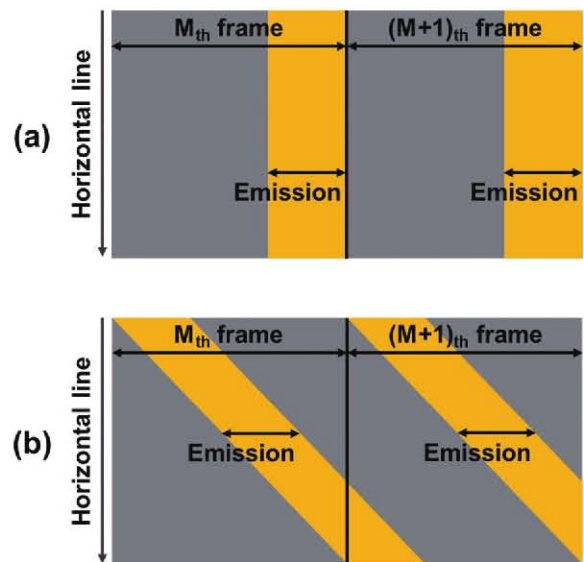


그림 6. (a) 동시발광과 (b) 순차발광 방식



circuit이 필요하다<sup>[5]</sup>. 이것은 많은 신호를 사용하는 Micro-LED 화소회로에서 더욱 큰 문제가 될 수 있다. 따라서 이 문제를 해결하기 위한 구동 방안이 갈구되고 있다.

#### 4. SWEEP Signal Generation

앞에서 언급했듯이, AMOLED 회로에 비교하여 PWM 방식을 사용하는 Micro-LED 구동 회로에서는 SWEEP signal이 추가적으로 필요하다. 때문에 순차발광 방식을 사용하는 경우 외부 driver circuit의 수와 복잡도가 더욱 증가하게 된다. 이를 해결하기 위한 방안 중 하나가 바로 SWEEP signal generator (SG) 이다. 그림 7(a)는 SG의 개념도를 나타내고 있다.<sup>[4]</sup> 제시된 SG (그림 7(b))는 gate

driver의 말단에 자리하여 같은 H line에 있는 픽셀들에게 동시에 SWEEP signal을 전달할 수 있다. 이때 SWEEP signal은 SG의 DRT에 전류가 흐르면서 각 line의 기생 커패시터인  $C_{line}$ 을 충전시키는 방식으로 만들어진다. DRT에 작은 전류가 흐르면  $C_{line}$ 에 저장된 전압이 천천히 증가하는데, 이때 DRT에 흐르는 전류와 DATA\_SG의 크기를 조절하면 linear하게 증가하는 SWEEP signal을 만들 수 있다. 그림 7(c)는 제시된 SG를 통해 생성된 SWEEP signal을 나타내고 있다. 그림 8은 제시된 SG가 Micro-LED 화소 회로에 적용되었을 때의 결과를 나타내고 있다. 이때 PWM 구동을 위한 추가적인 SWEEP signal과 SG를 구동시키기 위한 신호가 필요하지 않으므로 SG를 사용하지 않는 경우와 대비해서 driver circuit의 부담을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 픽셀의 크기도 감소시킬 수 있다.

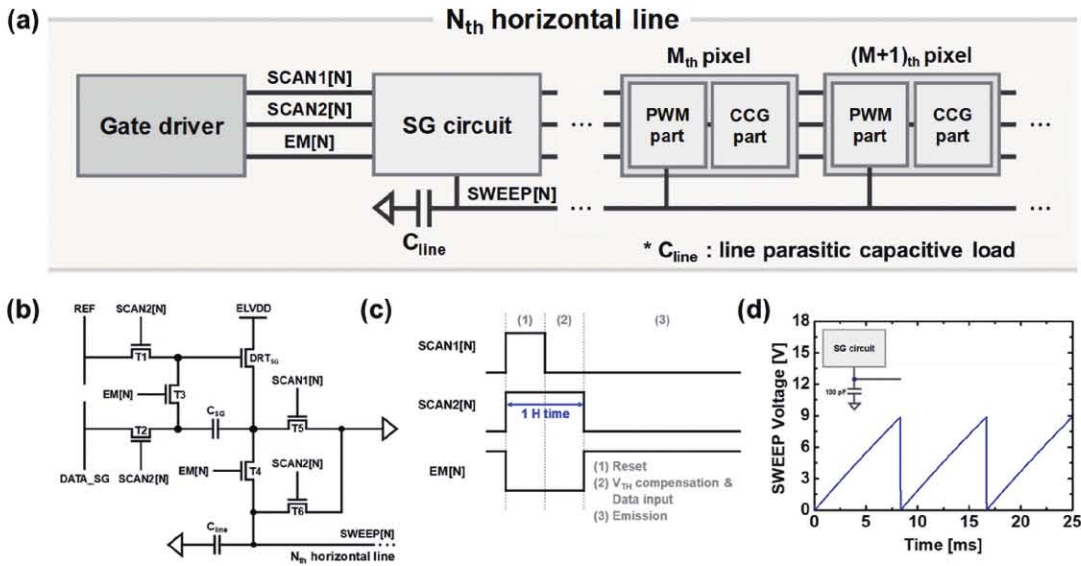


그림 7. (a) SWEEP signal generator의 개념도, (b) SWEEP signal generator 회로와 (c) 회로의 timing diagram 및 (d) 생성된 SWEEP signal

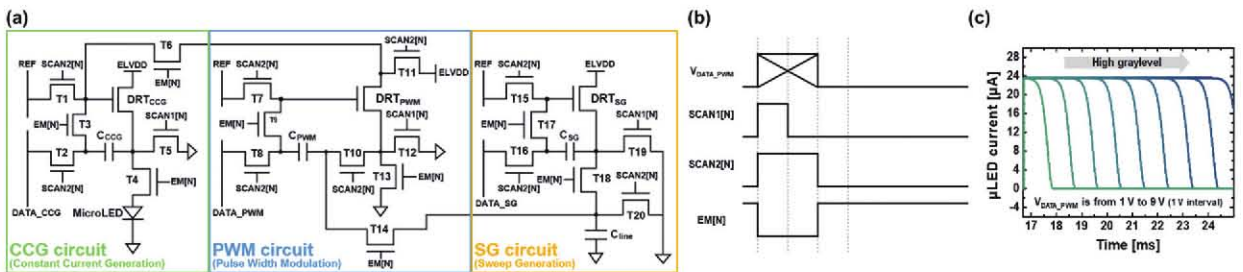


그림 8. (a) Micro-LED 회로에 SG를 적용시킨 경우, (b) Timing diagram, (c) PWM DATA에 따른 Micro-LED 전류 파형<sup>[5]</sup>

### 5. Falling Time

이상적으로 PWM 구동의 Micro-LED 전류 파형은 falling time이 0이다 (그림 7(a)). 그러나 실제로는 PWM unit의 DRT의 소자 특성 및 동작 과정으로 인하여 PWM unit이 이상적인 switch로 작동하지 못하므로 falling time이 나타나게 된다 (그림 7(b)). Micro-LED 전류의 falling time이 긴 경우 falling time 동안의 전류 밀도 변화에 의한 색 좌표 변화가 나타날 수 있으며 고정 전류로 표현 가능한 gray level의 수가 감소하고 초저계조에서의 정확한 색 표현이 불가능하다.<sup>[6]</sup> Micro-LED의 falling time은 Sweep signal의 기울기뿐만 아니라 PWM unit의 DRT의 이동도 및 subthreshold swing과 연관이 있다.<sup>[7, 8]</sup> 따라서 소자의 구동 능력 향상을 통해 falling time을 감소시킬 수 있다. 그러나 긴 falling time을 회로 구조를 통해 해결하려는 사례가 증가하고 있다. CCG unit의 on/off state를 하나의 PWM DRT의 동작에 의존하는 기존의 Micro-LED 화소회로와 달리 inverter를 사용하여 PWM unit을 구성하는 방식이다. [9]의 경우 10  $\mu$ s이하의 falling time을 달성하였다. 이때 inverter를 구성하는 oxide TFT에 double gate a-IGZO TFT를 사용하여 회로의 안정성을 더욱 높였다. [10]의 경우 a-IGZO TFT만을 이용하여 n-type inverter를 구성하였는데, depletion-mode에서 동작하는 a-IGZO의 특성을 이용하여 depletion-mode inverter를 이용하였다 (그림 10). 이때 inverter의 output을 다시 input으로 전달시키는 clamped inverter 구조를 이용하여 회로의 안정성을 높이고 falling time을 91.2  $\mu$ s까지 감소시켰다. 표 1은 inverter 구조를 이용한 Micro-LED 화소회로 및 기존 구조를 이용한 Micro-LED 화소회로의 falling time과 표현 가능 계조를 나타

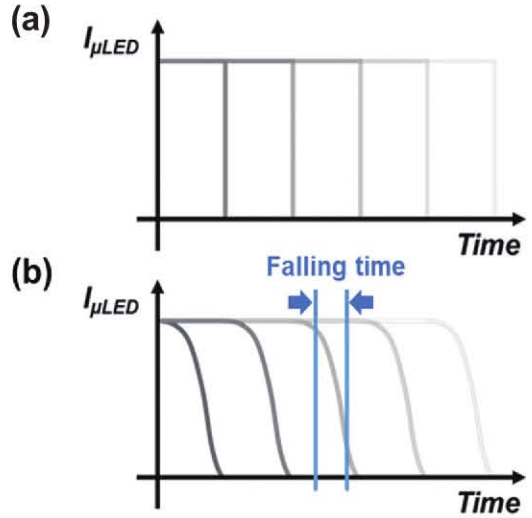


그림 9. (a) 이상적인 경우와 (b) 실제 마이크로LED 전류 파형

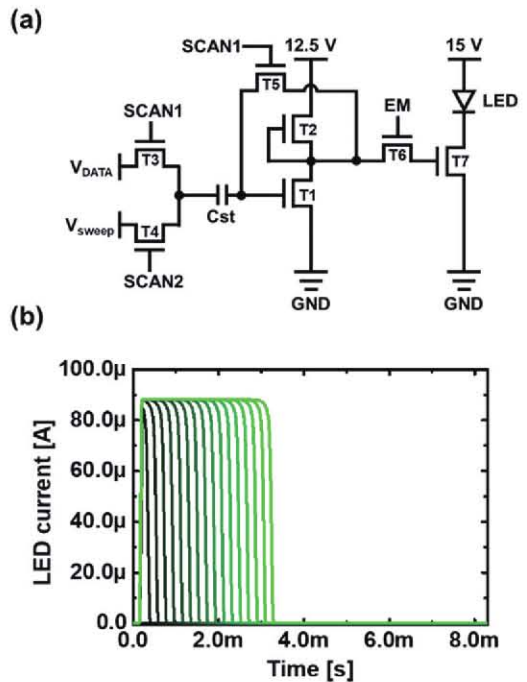


그림 10. (a) inverter 구조의 PWM unit 을 이용한 회로의 예시와 (b) Micro-LED 전류 파형<sup>[10]</sup>

표 1. 다양한 Micro-LED 화소회로의 PWM unit 구조 및 각 회로의 falling time

	Ref [9]	Ref [10]	Ref [11]	Ref [7]	Ref [8]
백플레인	LTPO TFTs	Oxide TFTs	LTPO TFTs	Oxide TFTs	Oxide TFT
PWM 유닛 구조	Complementary inverter	N-type only depletion mode inverter	Conventional	Conventional	Conventional
표현 가능 계조	10bit	NA	10bit	NA	NA
Falling-Time	10 $\mu$ s	91.2 $\mu$ s	>100 $\mu$ s	~1ms	>300 $\mu$ s

내고 있다. 이를 통해 같은 소자로 backplane을 구성하는 경우 inverter 구조를 사용하는 것이 falling time 감소 및 정확한 색 표현에 유리함을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 글에서는 Micro-LED 디스플레이를 위한 능동 구동 기술에 대해 살펴보았다. Micro-LED는 기존 OLED 대비 burn-in 현상이 발생하지 않는다는 점과 더불어 여러 우수한 특성들로 인하여 차세대 디스플레이 기술로 주목받고 있다. 차세대 디스플레이로 주목받고 있다. Micro-LED 디스플레이의 효과적인 상용화를 달성하기 위해서는 광학 특성을 보완하고 저소비전력 구동 및 세밀한 계조표현을 가능하게 하는 구동 기술 개발이 필수적이다. 이에 관해 본 글에서는 PWM 구동 방식 및 순차 발광 방식을 소개하였고, 순차 발광 방식에서의 외부 driver circuit의 복잡성을 해결하기 위한 SWEEP signal generation 회로와 긴 falling time을 해결하기 위한 inverter-based PWM 구동 방식을 소개하였다. 이 외에도 OLED 픽셀 회로 대비 TFT 수의 증가에 따른 회로 면적 증가와 전력 소비량의 감소와 같은 문제를 해결해야 한다. Micro-LED와 TFT backplane을 위한 공정 기술 개발뿐만 아니라 구동 기술에 대한 이해도를 높인다면 Micro-LED를 통한 차세대 디스플레이 시장 선도가 가능할 것이다.

## 참고문헌

[1] E.-L. Hsiang, *Journal of the Society for Information Display* **29(6)**, 446 (2021)  
 [2] E.-H. Land, J.-J. McCann, *Josa* **61(1)**, 1 (1971)  
 [3] O. François, *Journal of luminescence* **191(1)**, 112 (2017)  
 [4] Z.G, *Journal of Applied Physics* **107(1)**, 013103 (2010).  
 [5] J. Kim, "Display module" U.S. Patent 11 551 605 B2, Jan. 10, 2023  
 [6] K.-S. Kang, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2023 (accepted)  
 [7] K.-S. Kang, *IMID*, 2023 (accepted)  
 [8] J. Oh, *IEEE Electron Device Letters* **42(10)**, 2496 (2021)

[9] P.-A. Zou, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **69(1)**, 4306 (2022)  
 [10] K.-S. Kang, *IEEE Journal of the Electron Devices Society* **11(1)**, 204 (2023)  
 [11] Y. Liu, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2023 (accepted)  
 [12] J.-H. Park, *IMID*, 2023 (accepted)  
 [13] E.-K. Jung, *SID Symposium Digest of Technical Papers* **52(1)**, 876 (2021)

## 저자약력

### 박찬진



- 2016년 ~ 2021년 : 이화여자대학교 전자공학과 학사
- 2021년 ~ 현재 : 서울대학교 전기·전자공학부 석박통합과정
- 관심분야 : 박막소자 기반 디스플레이 회로 설계

### 강경수



- 2014년 ~ 2018년 : 서울대학교 전기·전자공학부 학사
- 2018년 ~ 현재 : 서울대학교 전기·전자공학부 석박통합과정
- 관심분야 : 박막소자 기반 디스플레이 회로 설계 및 박막 소자 특성 분석

### 박지환



- 2014년 ~ 2020년 : 인하대학교 전자공학 과 학사
- 2020년 ~ 현재 : 서울대학교 전기정보공학부 석박통합 과정
- 관심분야 : 박막 소자 기반 회로 설계 및 박막 소자 특성 분석

## 이수연



- 2009년 : 서울대학교 전기·전자공학부 학사
- 2013년 : 서울대학교 전기·전자공학부 박사
- 2013년 ~ 2019년 : 삼성디스플레이 선임 연구원
- 2019년 ~ 2023년 : 서울대학교 조교수
- 2023년 ~ 현재 : 서울대학교 부교수

• 관심분야 : 박막소자 공정 및 박막소자 기반 디스플레이 회로설계 및 공정, 뉴로모픽 소자 및 회로